کاربرد الگوریتم بیلان انرژی(SUTSEBAL) در تخمین میزان آب مصرفی در دشت ورامین

فائزه خاکبازان فرد[۱] ، مسعود تجریشی[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب دانشکده مهندسی عمران و دفتر مطالعات آب و محیط زیست دانشگاه صنعتی شریف، Faezehkhakbazan@yahoo.com

۲-دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دفتر مطالعات آب و محیط‌زیست دانشگاه صنعتی شریف، Tajrishy@sharif.edu

خلاصه

ایران در یک منطقه خشک و نیمه‌خشک واقع شده است. از کل منابع آبی که هر سال در کشور استحصال می‌شود، حدود ۹۴ درصد آن در بخش کشاورزی مصرف می‌گردد. در ایران با توجه به شرایط اقلیمی، محدودیت منابع آب و محدودیت اراضی دارای پتانسیل تولید کشت دیم ، مدیریت تامین و مصرف آب نقش اساسی در تولید به عهده دارد. تبخیر و تعرق یکی از فرآیندهای اساسی هیدرولوژیکی از منظر کشاورزی بوده و میزان آب مصرفی در بخش کشاورزی برابر تبخیر و تعرق از سطح زمین‌های کشاورزی می‌باشد . محاسبه تبخیر و تعرق نیاز به داده‌های میدانی زیادی دارد که بعضا در بسیاری از حوزه‌ها در دسترس نبوده و یا این‌که با گسترش و توسعه‌های ایجاد شده در حوزه سازگاری ندارند. الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین (SEBAL[۳]) یک مدل با پایه ترمودینامیک بوده و با کاربرد آن در حوزه‌های بزرگ و یا مناطقی که با کمبود داده مواجه هستند می‌توان تبخیر و تعرق را تخمین زد. در این مقاله ضمن توسعه یک مدل بیلان انرژی همانند الگوریتم SEBAL تحت عنوان الگوریتم SUTSEBAL، آب مصرفی در بخش کشاورزی در دشت ورامین تخمین زده شده‌است. این الگوریتم با تغییر برخی از روابط تعریف شده در الگوریتم SEBAL در دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف توسعه داده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که این الگوریتم قادر است با دقت قابل قبولی میزان آب مصرفی در بخش کشاورزی را با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر و در بازه زمانی دلخواه تخمین بزند. هم چنین از نتایج به دست آمده می‌توان برای کالیبره کردن مدل‌های هیدرولوژیکی و تخمین کارایی آب بهره گرفت.

کلمات کلیدی: الگوریتم SUTSEBAL ، تکنیک‌های سنجش از دور، تبخیر و تعرق واقعی، دشت ورامین

۱. مقدمه

در ایران با توجه به شرایط اقلیمی، محدودیت منابع آب و محدودیت اراضی دارای پتانسیل تولید کشت دیم ، مدیریت تامین و مصرف آب نقش اساسی در تولید به عهده دارد. بازده آب برداشت شده در بخش کشاورزی در کشور در مقایسه با میانگین بین‌المللی ناچیز است. به عقیده بیشتر صاحب‌نظران مدیریت آب، کشورهایی که با بحران آب مواجه می‌باشند در صورتی می‌توانند نسبت به آینده خود امیدوار باشند که در جهت افزایش کارایی و بهره - وری آب به ویژه در بخش کشاورزی ، که مصرف کننده عمده آب است ، تلاش کنند . [۱]

اولین گام در ارزیابی کارایی مصرف آب در وضعیت موجود تخمین میزان آب مصرفی در هر بخش است . تبخیر و تعرق یکی از فرآیندهای اساسی هیدرولوژیکی از منظر کشاورزی بوده و میزان آب مصرفی در بخش کشاورزی برابر تبخیر و تعرق از سطح زمین‌های کشاورزی می‌باشد . بنابراین توجه به این پارامتر در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب و توسعه آبیاری از اهمیت بالایی برخوردار است و این مسئله در مناطق خشک و نیمه - خشک مثل ایران جایگاه ویژه‌ای پیدا می‌کند .

3- Surface Energy Balance Algorithm for Land

محاسبه آب مصرفی در بخش کشاورزی نیاز به داده‌های میدانی زیادی دارد که بعضا در بسیاری از حوزه‌ها در دسترس نبوده و یا این‌که با گسترش و توسعه‌های ایجاد شده در حوزه سازگاری ندارند. علاوه بر این جمع‌آوری برخی از این داده‌ها اغلب گران بوده و قابل تکرار کردن نمی‌باشد. تصاویر ماهواره‌ای ابزاری مناسب برای دستیابی به این‌گونه داده‌ها بوده و داده‌های مورد نیاز را به صورت قابل اطمینان و سازگار با توسعه حوزه با هزینه کم در اختیار ما قرار می‌دهد. این تصاویر با پایش تغییرات زمانی و مکانی مصرف آب و پوشش گیاهی و مقایسه این شرایط در زمین‌های تحت کشت دیم و آبی نتایج قابل قبولی در اتخاذ تصمیمات مناسب جهت راهبری شرایط توسعه آبیاری فراهم می‌کند. [۴و۳]

از جمله تکنیک های موجود برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین[1] است که یک مدل با پایه ترمودینامیک بوده و با کاربرد آن در مناطقی که با کمبود داده مواجه هستند می‌توان تبخیر و تعرق[2] (ET) ، که یکی از اجزای مهم بیلان آب است، را تخمین زد. هم‌چنین با توجه به این‌که SEBAL قادر است میزان ماده خشک[3] تولید شده در سطح زمین را محاسبه کند ، ابزاری کارآمد برای ارزیابی بهره‌وری و کارایی آب در اختیار محققان می‌باشد. در این مطالعه ضمن توسعه مدلی شبیه به مدل SEBAL تحت عنوان الگوریتم SUTSEBAL ، آب مصرفی در بخش کشاورزی در دشت ورامین محاسبه شده است. این الگوریتم با بومی کردن روابط تعریف شده در الگوریتم SEBAL در دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی عمران توسعه داده شده است. [۳]

الگوریتم SEBAL تا کنون در مطالعات گوناگونی در نقاط مختلف دنیا به کار رفته و صحت‌سنجی شده‌است. این الگوریتم در سال ۱۹۹۸ توسط Bastiaanssen برای تخمین تبخیر و تعرق گیاهی در مقیاس حوزه‌ای توسعه داده شد.[۵] Bastiaanssen and Zwart (2007) از این مدل برای محاسبه توزیع مکانی کارایی آب در ۸ سیستم آبیاری گندم استفاده نمودند. آنان در این مطالعه برای تعیین تغییرات میزان محصول به دست آمده ، ET و کارایی آب از تصاویر ماهواره‌ای استفاده کردند. ET تخمینی برای مزارع آبیاری شده در Yaqui valley و در کشور مکزیک اعتبارسنجی شده و نتایج دقت بالای این تخمین را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با نگه داشتن میزان محصول تولید شده در مقدار فعلی امکان کاهش ۱۴ درصدی در ET وجود دارد.[۶]

Jewitt and Kongo (2006) با به کار بردن الگوریتم SEBAL و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، مصرف آب کشاورزی را در حوزه‌ی Potshini در جنوب آفریقا مورد بررسی قرار داده‌اند. هدف در این مطالعه بررسی اثر استفاده از آب بر اکولوژی و هیدرولوژی منطقه مورد نظر بوده است. برای این منظور از مدل‌سازی هیدرولوژیکی و تکنیک سنجش از دور و الگوریتم SEBAL برای تخمین توزیع مکانی تبخیر کل در ناحیه تحت پوشش استفاده شده‌است. نتایج به دست آمده می‌تواند در انتخاب استراتژی‌های مختلف مصرف آب برای افزایش تولید محصول و توازن هیدرولوژیکی-اکولوژیکی در ناحیه نیمه خشک Savannahs در آفریقا استفاده شود. [۷]

Bastiaanssen et al. (2006) برای بررسی عملکرد سیستم آبیاری حوزه رودخانه زاینده‌رود در اصفهان از الگوریتم SEBAL استفاده نمودند . تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از الگوریتم SEBAL تحلیل شده و مقدار واقعی و پتانسیل ET و محصول تولید شده به دست آمده‌است. ET محاسبه شده به منظور تخمین برداشت از آب‌های زیرزمینی و برداشت منظور نشده از رودخانه مورد استفاده قرار گرفته است . عملکرد سیستم با استفاده از بهره‌وری آب ،که به صورت محصول تولید شده بر حسب کیلوگرم به ازای واحد آب تبخیر شده تعریف می‌شود، ارزیابی شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که بهره‌وری سیستم‌های آبیاری شده از آب سطحی ($0.72kgm^{-3}$) بیش‌تر از سیستم‌های دیگر می‌باشد که این مسئله بیانگر تفاوت کیفیت آب‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی است . [۸]

۲. روش انجام کار

۲-۱- الگوریتم SEBAL

مقدار انرژی که در یک مکان ، فصل و زمان معینی از طرف خورشید به سطح معینی از زمین (مزرعه) می‌رسد مشخص و قابل محاسبه است . از طرفی مقدار آبی که با این مقدار انرژی می‌تواند تغییر حالت دهد نیز مشخص است . بنابراین می‌توان مقدار آبی که از سطح تحت کشت نباتی با استفاده از انرژی نهان بخار و وارد اتمسفر شده (میزان مصرف آب) را محاسبه نمود . [۳]

(1) SEBAL
(2) Evapotranspiration (ET)
(3) BiomasS

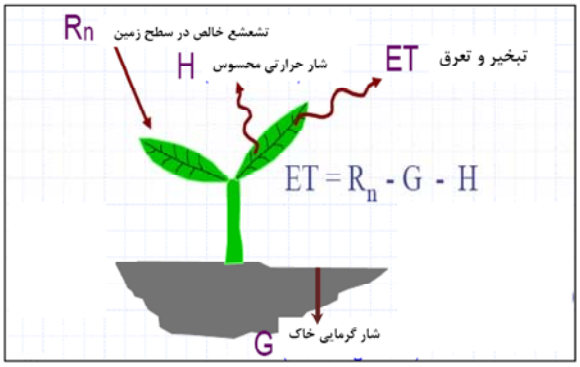
تا کنون روش‌های متعددی برای تخمین تبخیر و تعرق (ET) گسترش داده و آزمون شده‌اند. این روش‌ها اغلب شامل یک یا چند متغیر اتمسفریک، که ترکیب آن‌ها شرایط سطح زمین را توصیف می‌کند، می‌باشند. مقدار واقعی تبخیر و تعرق[1] یکی از مفیدترین شاخص‌ها برای بررسی این است که آیا آب به مصرف موردنظر رسیده‌است یا نه . متأسفانه هنوز تخمین تبخیر و تعرق واقعی تحت شرایط واقعی زمین امکان‌پذیر نیست. روش‌های موجود برای تخمین ET به داده‌های میدانی زیادی نیاز دارند که بعضا در بسیاری از حوزه‌ها در دسترس نبوده و یا این‌که با گسترش و توسعه‌های ایجاد شده در حوزه سازگاری ندارند . علاوه بر این جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز اغلب گران بوده و قابل تکرار کردن نمی‌باشد . [۵] بنابراین می‌توان گفت که اگر داده‌های مورد نیاز به صورت قابل اطمینان و سازگار با توسعه حوزه با هزینه کم در دسترس باشند ، می‌تواند گزینه‌ی بهتری برای مدیریت آب در یک حوزه باشد . سنجش از راه دور (RS) و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای یکی از گزینه‌هایی است که در دو- سه دهه‌ی اخیر روش‌های محاسبه تبخیر و تعرق بر پایه آن توسعه یافته‌اند. وجود ماهواره‌های مختلف با قدرت تفکیک زمانی و مکانی متفاوت ، پوشش زمانی و مکانی مناسبی را جهت استخراج و تحلیل داده‌ها فراهم نموده است. البته طبق گفته محققان بهینه‌ترین نوع مدل‌سازی تبخیر و تعرق به کمک سنجش از راه دور هنگامی صورت می‌پذیرد که اطلاعات RS به عنوان اطلاعات اولیه و اطلاعات ایستگاه‌های زمینی به عنوان اطلاعات ثانویه تواما به کار روند. چرا که اطلاعات حاصل از سنجش از دور در مکان پیوسته و در زمان گسسته است، در حالی که اطلاعات زمینی- ایستگاهی در زمان پیوسته و در مکان دچار گسستگی می‌باشند. بر مبنای اطلاعات به دست آمده از RS ، Bastiaanssen در سال ۱۹۹۵ الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین ، SEBAL ، را توسعه داد که این الگوریتم تا کنون به صورت گسترده‌ای در کشورهای گوناگون استفاده و اعتبارسنجی شده است .[۳]

همان‌طور که گفته شد در این مطالعه از الگوریتم تغییر داده شده تحت عنوان SUTSEBAL برای تخمین میزان تبخیر و تعرق استفاده شده‌است. انرژی خالص رسیده به سطح زمین علاوه بر گرم نمودن زمین و هوای اطراف آن، صرف تعرق گیاه و تبخیر از سطح خاک و برگ گیاهان می‌گردد. این فرآیند فیزیکی که پایهٔ الگوریتم SUTSEBAL را تشکیل می‌دهد در شکل ۱ نشان داده شده‌است. براین اساس تابش خالص خورشیدی، منبع انرژی و H ، G و ET مصرف کنندگان انرژی هستند.

$$\lambda ET = Rn - G - H \qquad (۱)$$

که در آن λET گرمای نهان تبخیر و تعرق (انرژی مورد استفاده جهت تبخیر و تعرق)، R_n تشعشع خالص در سطح زمین، G جریان گرمایی زمین و H جریان گرمای محسوس می باشند.

الگوریتم بیلان انرژی یک مدل پردازش تصویر است که طی گامهای محاسباتی متعدد، تبخیر و تعرق واقعی(ET_{act}) و سایر تبادلات انرژی را در سطح زمین با استفاده از داده‌های رقومی[2] جمع آوری شده توسط سنجنده ماهواره تعیین می کند. در این روش ET به عنوان یکی از مولفه های انرژی در هر پیکسل محاسبه می‌گردد. اطلاعات ورودی کلیدی SUTSEBAL استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای شامل تابش طیفی در گستره مرئی، نزدیک فروسرخ و مادون قرمز حرارتی می باشد. [۳]



شکل۱- مولفه های بیلان انرژی در سطح زمین

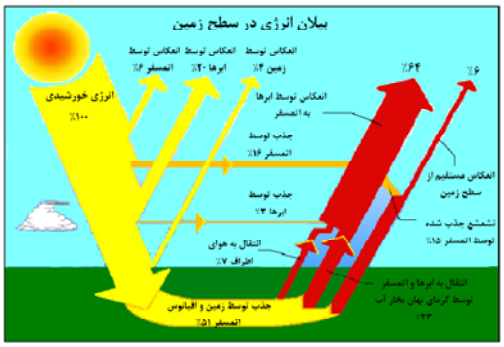
الف- تشعشع خالص در سطح زمین (R_n)

اصلی ترین منبع انرژی برای پدیده تبخیر از سطح آب، انرژی تابشی خورشید است. این مقدار، نتیجه بیلان تشعشعات ورودی و خروجی طول موج های مثبت و منفی در سطح زمین است. مولفه‌های تابش‌های طول موج کوتاه و بلند ورودی و خروجی در شکل ۲ نشان داده شده است. تراز بین تابشهای موج کوتاه و بلند که انرژی خالص را به وجود می‌آورد، رابطه ای به صورت زیر خواهد داشت :

$$R_n = R_S \downarrow - R_S \uparrow + R_L \downarrow - R_L \uparrow \qquad (۲)$$

(1) Actual Evapotranspiration (ET_{act})
(2) Digital

که در آن $R_S \downarrow$ تابش ورودی طول موج کوتاه، $R_S \uparrow$ تابش خروجی طول موج کوتاه، $R_L \downarrow$ تابش ورودی طول موج بلند و $R_L \uparrow$ تابش خروجی طول موج بلند (همگی بر حسب $MJ\ m^{-2} day^{-1}$) می باشند.



شکل۲- مولفه‌های بیلان تابش‌های ورودی و خروجی

ب- شار گرمایی خاک(G)

در طول روز، بخشی از انرژی رسیده به سطح زمین باعث گرم شدن خاک وجریان حرارتی در خاک، بوسیلهٔ یک گرادیان حرارتی باعث گرم شدن لایهٔ بالایی خاک می‌گردد. این مقدار باتوجه به میزان پوشش گیاهی تفاوت می‌کند زیرا وجود پوشش گیاهی مانع رسیدن نور به سطح زمین می‌گردد. همچنین شرایط رطوبت سطحی نیز بر میزان انتقال حرارت خاک موثر است. بنابراین معمولا G را به R_n و رطوبت خاک ارتباط می دهند .روابط به دست آمده برای تعیین G تجربی می‌باشند. رابطهٔ پیشنهادی توسط Bastiaanssen (۱۹۹۵)، در الگوریتم SEBAL برای هر پیکسل بر روی زمین مطابق رابطه ذیل است که بعد از پردازش تصاویر و تولید نقشه‌های رقومی به صورت لایه‌های اطلاعاتی به دست می‌آید :

$$G = R_n.\{\frac{(T_s - 273)}{\alpha_s}.[0.0032.(c_1.\alpha_s) + 0.0062.(c_1.\alpha_s)^2].(1 - 0.978.NDVI^4)\} \quad (۳)$$

که در آن R_n تابش خالص خورشیدی($MJ\ m^{-2} day^{-1}$)، T_s دمای سطح زمین(کلوین)، α_s آلبدو باند وسیع در سطح زمین(بدون بعد)، NDVI شاخص پوشش گیاهی نرمال شده(بدون بعد) و c_1 فاکتور تبدیل مقادیر لحظه ای آلبدو به میانگین روزانه می‌باشد.

ج- شار حرارتی محسوس(H)

شار گرمای محسوس بخشی از تابش خالص خورشیدی است که صرف گرم کردن هوا می‌گردد. انتقال حرارت از سطح به اتمسفر، روندی آیرودینامیک است. در تئوری آیرودینامیک، انتقال مومنتم، بخار آب، حرارت محسوس و .. می‌تواند بوسیلهٔ روابطی مانند معادلات زیر تخمین زده شود.

$$\tau = \rho_a K_m \frac{\partial U}{\partial z} \quad (۴)$$

$$H = \rho_a C_p K_h \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (۵)$$

که در آن K_h ضریب تبادل گردابی مومنتم، ρ_a چگالی هوا [kg/m^3]، C_p گرمای ویژه درفشار معین [KJ/kg/°K] و $\frac{\partial \theta}{\partial z}$ گرادیان عمودی دمای پتانسیل و $\frac{\partial U}{\partial z}$ گرادیان عمودی سرعت باد است.

د- تبخیر وتعرق (ET)

پس از تعیین R_n, G و H مقدار گرمای نهان تبخیر به عنوان باقیمانده معادله بیلان انرژی بدست می‌آید. با توجه به رابطه λ, مقدار ET برحسب میلیمتر در روز از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$E = (R_n - H - G)/(2501 - 23601 \times T_a) \times 1000 \quad (۶)$$

توضیحات بیشتر در مورد الگوریتم SEBAL و SUTSEBAL در دیگر مراجع [۳و۵] ارائه شده است.

۲-۲- محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از نرم‌افزار CROPWAT

به منظورصحت‌سنجی نتایج به دست آمده از الگوریتم بیلان انرژی، تبخیر و تعرق پتانسیل در منطقه با استفاده از نرم‌افزار CROPWAT نیز محاسبه شده است. این نرم‌افزار توسط سازمان خوار و بار سازمان ملل متحد (FAO) در دهه ۹۰ میلادی و با به کار بردن معادله پنمن- مانتیث برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل ارائه شده‌است. معادله پنمن-مانتیث به صورت زیر تعریف شده‌است: [۹]

$$ET_0 = \frac{0.48\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T+273}U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \qquad (۷)$$

که در آن ET_0 تبخیر و تعرق پتانسیل (mm/day) ، R_n تابش خالص خورشیدی در سطح زمین (MJ/m^2day)، G شار گرمایی خاک (MJ/m^2day)، T میانگین درجه حرارت هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین ($^\circ C$)، U_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (m/s)، e_s فشار بخار اشباع (KPa)، e_a فشار بخار واقعی (KPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار ($KPa/^\circ C$) و γ ثابت سایکرومتریک ($KPa/^\circ C$) می‌باشد.

تبخیر و تعرق محاسبه شده از این روش تبخیر و تعرق مرجع بوده و برای این‌که معادل تبخیر و تعرق واقعی باشد باید در ضریب محصولات[1] ضرب شود :

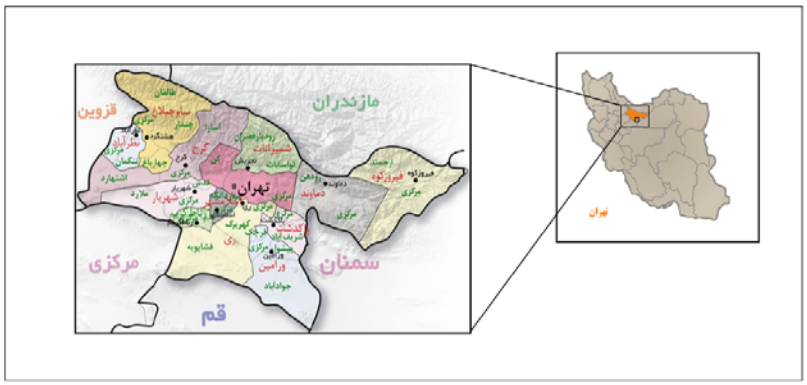
$$ET_c = ET_0 \times K_c \qquad (۸)$$

که در آن ET_c تبخیر و تعرق واقعی(mm/day) ، ET_0 تبخیر و تعرق مرجع (mm/day) و K_c ضریب محصولات (بدون واحد) می‌باشد.

ضریب محصولات تحت تاثیر عوامل مختلفی مانند ارتفاع محصول، بخشی از سطح که توسط برگ پوشیده شده و مساحت سطح برگ گیاه می‌باشد. بنابراین محصولات کشاورزی مختلف ضریب محصولات متفاوتی را خواهند داشت. [۹]

۳. منطقه مورد مطالعه

شهرستان ورامین در فاصله ۳۰ کیلومتری جنوب شرقی تهران و در دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی بین طولهای جغرافیایی ۷۵-۳۸ و ۴۰-۳۹ و عرضهای جغرافیایی ۵۴ و ۵۹ واقع شده است . دشت ورامین از طرف شرق به دشت ایوانکی و از غرب به منطقه غار فشاپویه و از سمت جنوب به تپه ماهورها محدود می‌باشد. مساحت این دشت تقریباً ۱۲۰۰ کیلومتر مربع بوده که به علت بیرون زدگی و فرورفتگی موجود، دشت مورد مطالعه دارای ارتفاعات متغیر با متوسط ۹۵۰ متر نسبت به سطح دریا می‌باشد. این ناحیه در زمستان سرد و تابستان گرم و خشک با خصوصیات آب و هوای کویری است. میزان بارندگی متوسط چهل ساله (۱۳۸۶-۱۳۴۶) دشت در ایستگاه جواد آباد ورامین ۱۳۱/۴ میلیمتر ثبت شده است. این شهرستان دارای قدمت کشاورزی است که به علت نزدیکی تهران می‌توان گفت یک بازوی تامین کننده محصولات کشاورزی در طول سالها نه فقط برای تهران بلکه سایر نقاط کشور نیز بوده است. منطقه مورد بحث جلگه‌ای است که از پتانسیل‌های آبی و خاکی بسیار خوبی برخوردار و مستعد کشاورزی بوده و می‌باشد. لیکن در دو دهه‌ی اخیر به دلیل برداشت‌های بی‌رویه از آبهای زیرزمینی و به کار نگرفتن اصول فنی و صحیح در آبیاری افت سطح آبهای تحت‌الارضی به خصوص در نقاطی که دشت استعداد تغذیه و جایگزینی آبهای استخراجی را نداشته است به طور قابل ملاحظه دیده می‌شود. [۲] شکل ۳ موقعیت دشت ورامین را در کشور و استان تهران نشان می‌دهد.



شکل ۳- موقعیت دشت ورامین در کشور و استان تهران

(1) Crop Coefficient , K_c

مساحت اراضی قابل کشت و سطح زیر کشت خالص دشت ورامین به ترتیب برابر ۷۵۶۸۰ و ۴۸۷۹۰ هکتار گزارش شده‌است. گندم و جو به تنهایی تقریبا نیمی از سطح زیر کشت را تشکیل می‌دهند و تقریبا در تمام طول سال در دشت ورامین محصول کشت می‌شود و این به معنای مصرف آب در طول این مدت می‌باشد. [۱۰] پس انتظار می‌رود که تبخیر و تعرق از سطح زمین در تمام طول سال وجود داشته باشد. صحت این فرضیه در بخش‌های بعد مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴. کاربرد الگوریتم SUTSEBAL در محاسبه آب مصرفی کشاورزی در دشت ورامین

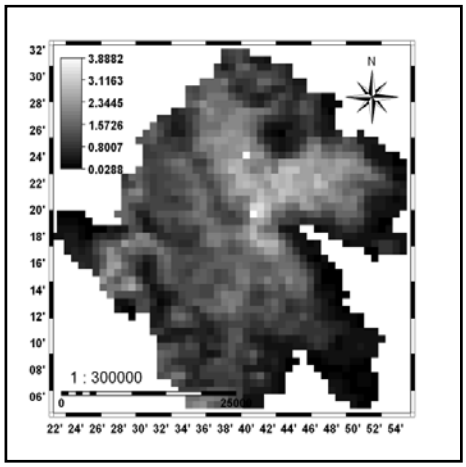
همان‌طور که اشاره شد، آب مصرفی در بخش کشاورزی معادل با میزان تبخیر و تعرق واقعی در سطح زمین می‌باشد و با استفاده از الگوریتم بیلان انرژی و به کمک تصاویر ماهواره‌ای می‌توان میزان تبخیر و تعرق واقعی را در بازه‌های زمانی و مکانی مورد نظر و با دقت مناسب محاسبه نمود. برای این منظور تصاویر ماهواره‌ای دشت ورامین در سال‌های آبی ۸۲-۱۳۸۱ تا ۸۴-۱۳۸۳ از ماهواره NOAA سنجنده AVHRR با قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر تهیه و از بین تصاویر سفارش داده شده و تصاویر بدون ابر برای محاسبه تبخیر و تعرق پردازش شده‌اند. تعداد تصاویر پردازش شده در هر ماه برای این سال‌ها در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

جدول۱ – تعداد تصاویر پردازش شده در هر ماه در این مطالعه

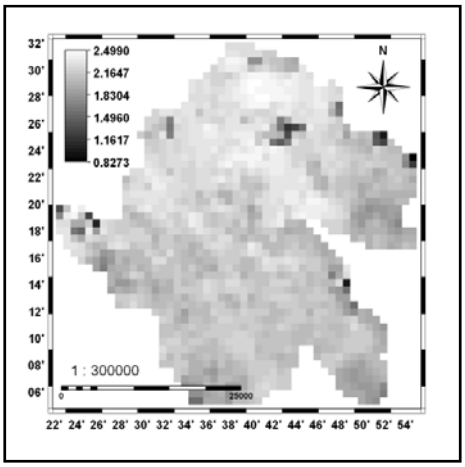
سال	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
۸۱-۸۲	۳	۳	۲	۱	۱	۱	۱	۳	۳	۳	۳	۳
۸۲-۸۳	۳	۳	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۳	۱	۳	۳
۸۳-۸۴	۳	۲	۱	۱	۱	۱	۳	۱	۲	۳	۳	۱

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که میزان تبخیر و تعرق در هر پیکسل در ماه‌های سرد بین ۳-۱ میلی‌متر در روز و در ماه‌های گرم بین ۱۰-۳ میلی‌متر در روز متغیر است. سپس با استفاده از این نقشه‌ها و مطابق با آن‌چه در بخش قبل به آن اشاره شد، نقشه تبخیر و تعرق ماهانه تولید گردید . لازم به ذکر است که تبخیر و تعرق محاسبه شده در این روش معادل تبخیر و تعرق کل پوشش گیاهی منطقه یعنی شامل مزارع و علفزارها می‌باشد. در ادامه چند نقشه توزیع تبخیر و تعرق از منطقه در روزهای مختلف به عنوان نمونه (شکل‌های ۴ تا ۶) مشاهده می‌شود.

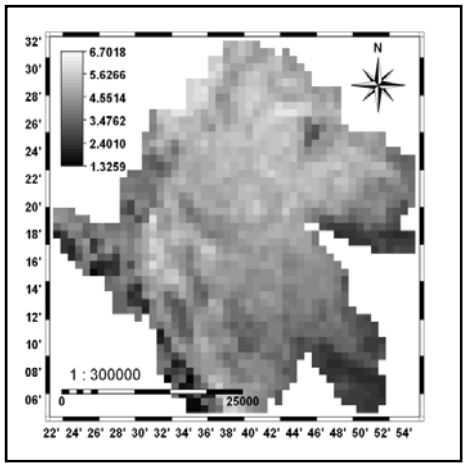
با توجه به این اشکال می‌توان گفت که تبخیر و تعرق در بخش‌های شمالی و مرکزی دشت نسبت به بخش‌های جنوبی بالاتر است. بالاتر بودن تبخیر و تعرق در این مناطق نشان دهنده‌ی دسترسی آسان‌تر به آب و تجمع اراضی کشاورزی در این مناطق می‌باشد. نقشه پوشش گیاهی به دست آمده از سنجنده MODIS در شکل ۷ نیز موید وجود زمین‌های کشاورزی در مناطق مذکور است.



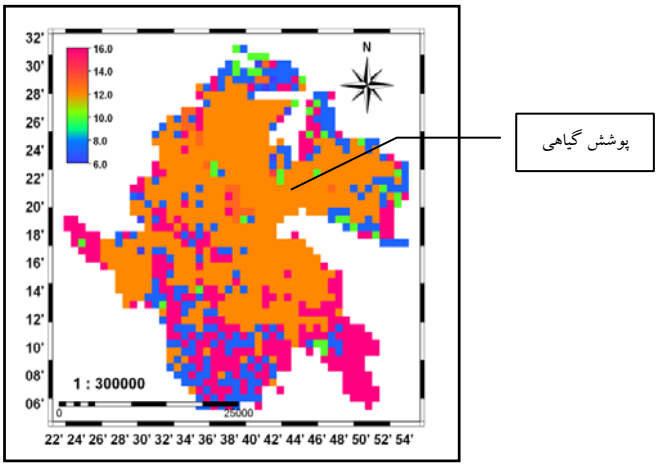
شکل ۴- نقشه توزیع تبخیر و تعرق در دشت ورامین
در روز ۲۵ خرداد ۱۳۸۲(میلی‌متر در روز)



شکل ۵- نقشه توزیع تبخیر و تعرق در دشت ورامین
در روز ۱۷ آذر ۱۳۸۲(میلی‌متر در روز)

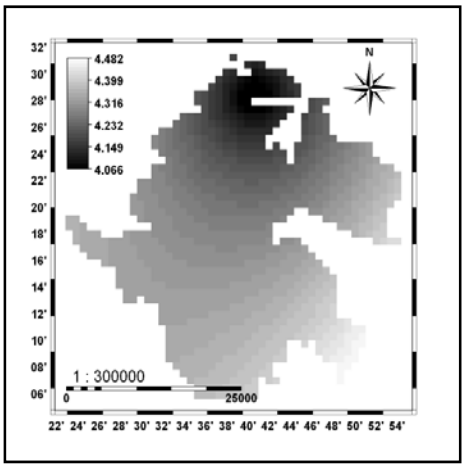


شکل ۶- نقشه توزیع تبخیر و تعرق در دشت ورامین در روز ۲۲ مرداد ۱۳۸۳(میلی‌متر در روز)

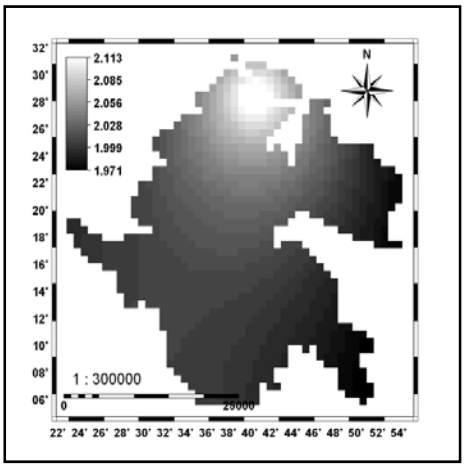


شکل ۷- نقشه پوشش گیاهی (Land Cover) در دشت ورامین

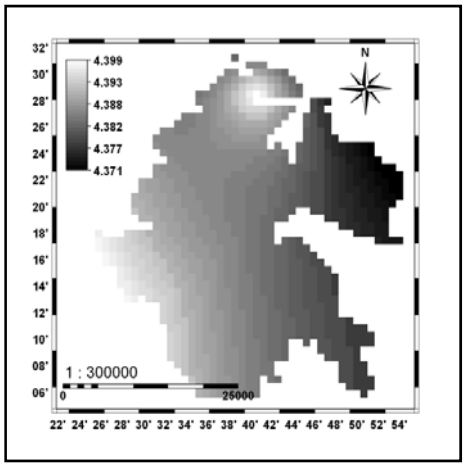
نتایج به دست آمده از کاربرد مدل CROPWAT در تولید نقشه توزیع تبخیر و تعرق پتانسیل در دشت ورامین در شکل‌های ۸ تا ۱۰ مشاهده می‌شود.



شکل ۸- نقشه توزیع تبخیر و تعرق پتانسیل در دشت ورامین در روز ۲۵ خرداد ۱۳۸۲ (میلی‌متر در روز)



شکل ۹- نقشه توزیع تبخیر و تعرق پتانسیل در دشت ورامین در روز ۱۷ آذر ۱۳۸۲ (میلی‌متر در روز)



شکل ۱۰- نقشه توزیع تبخیر و تعرق پتانسیل در دشت ورامین در روز ۲۲ مرداد ۱۳۸۳ (میلی‌متر در روز)

جدول ۲ محدوده تغییرات تبخیر و تعرق محاسبه شده از دو روش مذکور را نشان می‌دهد.

جدول ۲- دامنه تغییرات تبخیر و تعرق محاسبه شده در سطح دشت (میلی‌متر در روز)

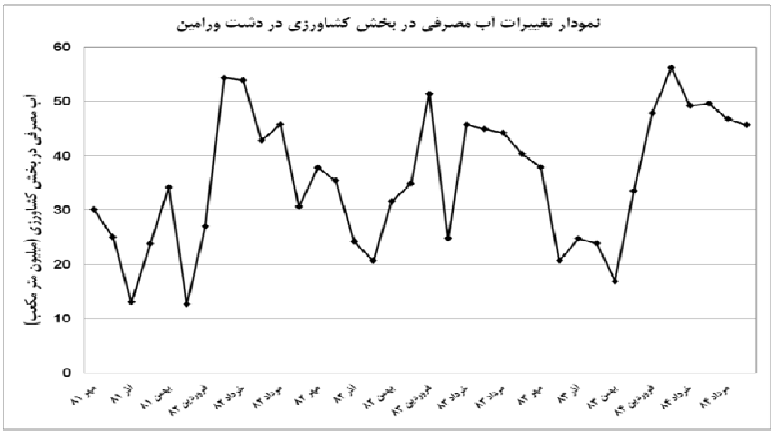
تاریخ تصویر	الگوریتم بیلان انرژی	معادله پنمن- مانتیث
۲۷ آبان ۱۳۸۱	۱-۲	۱/۱-۱/۲
۲۵ خرداد ۱۳۸۲	۲/۵-۵/۵	۴-۴/۵
۱۷ آذر ۱۳۸۲	۲-۲/۵	۲-۲/۱
۲۲ مرداد ۱۳۸۳	۲/۵-۶/۵	۴/۳-۴/۴
۲۹ مهر ۱۳۸۳	۲-۵	۴/۲-۴/۴
۲۷ مرداد ۱۳۸۴	۲-۶	۳/۹-۴/۱

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که توزیع تبخیر و تعرق به دست آمده از روش پنمن- مانتیث نسبت به توزیع تبخیر و تعرق محاسبه شده با استفاده از الگوریتم SUTSEBAL یکنواخت‌تر است. اما علی‌رغم اینکه دامنه‌ی تغییرات تبخیر و تعرق به دست آمده از دو روش مذکور با هم متفاوت است، میزان تبخیر و تعرق غالب در سطح دشت یکسان است.

در مرحله بعد با استفاده از نقشه توزیع تبخیر و تعرق ماهانه و در نظر گرفتن پوشش گیاهی در هر پیکسل تصویر ، تبخیر و تعرق آن پیکسل و آب مصرفی در بخش کشاورزی در دشت (بدون در نظر گرفتن تلفات در مزرعه و راندمان آبیاری) تخمین زده شده است . بر این اساس آب مصرفی در بخش کشاورزی برای سال‌های ۸۲-۸۱ ، ۸۳-۸۲ و ۸۴-۸۳ به ترتیب برابر۳۹۴ ،۴۳۶و ۴۵۳ میلیون متر مکعب به دست آمده است. لازم به ذکر است که مقادیر فوق شامل مجموع آب مصرفی توسط پوشش گیاهی منطقه و محصولات کشاورزی زیر کشت آبی می‌باشد. جدول ۳ و شکل ۱۱ تغییرات ماهانه مصرف آب کشاورزی در سطح دشت را در این سال‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۳- تخمین آب مصرفی در بخش کشاورزی در دشت ورامین طی سال‌های ۸۴-۱۳۸۱ (میلیون متر مکعب)

سال	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مجموع
۸۲-۸۱	۳۰/۲	۲۵/۱	۱۳/۱	۲۳/۹	۳۴/۲	۱۲/۷	۲۷/۱	۵۴/۴	۵۳/۹	۴۲/۹	۴۵/۸	۳۰/۷	۳۹۳/۸
۸۳-۸۲	۳۷/۸	۳۵/۵	۲۴/۲	۲۰/۷	۳۱/۷	۳۴/۹	۵۱/۵	۲۴/۸	۴۵/۸	۴۵	۴۴/۳	۴۰/۴	۴۳۶/۵
۸۴-۸۳	۳۷/۹	۲۰/۷	۲۴/۹	۲۳/۹	۱۶/۹	۳۳/۶	۴۷/۹	۵۶/۳	۴۹/۳	۴۹/۷	۴۶/۹	۴۵/۷	۴۵۳/۵



شکل ۱۱ – نمودار تغییرات ماهانه آب مصرفی در بخش کشاورزی در دشت ورامین طی سال‌های ۸۴-۱۳۸۱ (میلیون متر مکعب)

گروه مهندسین مشاور یکم در مطالعات ساماندهی آب‌های سطحی جنوب تهران میزان برداشت از آب‌های سطحی و زیرزمینی دشت ورامین را ۶۹۴ میلیون مترمکعب گزارش کرده‌اند.[۱۱] با در نظر گرفتن راندمان آبیاری که این گروه برای آب‌های زیرزمینی و سطحی اعلام کرده‌اند، میزان آب مصرفی در بخش کشاورزی حدود ۳۲۰ میلیون مترمکعب به دست می‌آید. با توجه به این‌که در الگوریتم بیلان انرژی در واقع آب مصرف شده در

بخش کشاورزی به همراه پوشش گیاهی و هم‌چنین آب مصرفی در اثر تبخیر از سطح زمین را به دست می‌آید، می‌توان گفت که نتایج به دست آمده از این الگوریتم با نتایج گزارش شده مطابقت خوبی دارد.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

الگوریتم SUTSEBAL یکی از تکنیک‌های استفاده از سنجش از دور است که با تغییر برخی از روابط الگوریتم SEBAL در دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی عمران توسعه داده شده است. مقایسه نتایج به دست آمده از کاربرد این الگوریتم در سطح دشت ورامین و مدل CROPWAT در سال آبی ۸۱-۸۲ نشان می‌دهد که الگوریتم SUTSEBAL قادر است تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس‌های بزرگ را با دقت قابل قبولی در مقیاس‌های مکانی و زمانی مورد نظر در اختیار تصمیم‌گیران قرار دهد. با به کار بردن الگوریتم SUTSEBAL ، آب مصرفی در بخش کشاورزی در دشت ورامین در سال - های آبی ۸۲-۱۳۸۱ تا ۸۴-۱۳۸۳ به ترتیب معادل ۳۹۴ ،۴۷۶و ۴۵۳ میلیون متر مکعب در هر سال برآورد شده‌است. نتایج به دست آمده از این مطالعه نشان می‌دهد که این الگوریتم قادر است توزیع آب مصرفی در بخش کشاورزی را با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومترمربع و در بازه زمانی دلخواه و با دقت مناسب در اختیار مدیران و برنامه‌ریزان منابع آب و سازمان‌های آب منطقه‌ای قرار دهد. ازآن‌جا که آب مصرف شده در بخش کشاورزی یکی از اجزای اصلی بیلان آب است، از نتایج به دست آمده می‌توان برای کالیبره کردن مدل‌های شبیه‌سازی هیدوروژیکی نیز بهره گرفت.

۶. منابع و مراجع

۱- کارایی اقتصادی آب و اصلاح الگوی کشت،۱۳۸۲ ، شرکت سهامی مدیریت منابع آب ایران ، معاونت برنامه‌ریزی ، دفتر اقتصاد آب، کد گزارش ۱۱۳-۰۹-۸۲-د

۲-گزارش حفاری چاه‌های پیزومتریک دشت ورامین، فروردین ۱۳۷۵، سازمان آب منطقه‌ای تهران

۳- عمادزاده، مریم، ۱۳۸۶ ، کاربرد سنجش از دور در تخمین کارایی آب در مقیاس حوضه ای : مطالعه موردی در زیرحوضه قره سو، پایان نامه کارشناسی ارشد ، دانشکده عمران ، دانشگاه صنعتی شریف

4- Ahmad, Mobin-ud-Din, Thulani F. Magagula, David Love, Victor Kongo, Marloes L. Mul and Jeniffer Kinoti, 2004, "Estimating Actual Evapotranspiration Through Remote Sensing Techniques to Improve Agricultural Water Management : A Case Study in The Transboundary Olifants Cachment in The Limpopo Basin , South Africa", Physics and Chemistry of the Earth 29, pp. 1109-1118, (2004)

5- Bastiaanssen, W.G.M, Menenti, M., Feddes, R.A., Holtslag, A.A.M.,"A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) ", Journal of Hydrology, pp. 198-212 , (1998)

6- Zwart, Sander J., Wim G.M. Bastiaanssen, 2007, " SEBAL for Detecting Spatial Variation of Water Productivity and Scope for Improvement in Eight Irrigated Wheat System", Agricultural Water Management 89, pp. 287-296, (2007)

7- Kongo, V.M., G.P.W. Jewitt, 2006, " Preliminary Investigation of Catchment Hydrology in Response to Agricultural Water Use Innovation : A Case Study of The Potshini Catchment– South Africa", Physics and Chemistry of the Earth 31, pp. 976-987, (2006)

8- Bastiaanssen, Wim, Ambro Gieske, Mehdi Akbari , Norair Toomanian, 2007, " Monitoring Irrigation Performance in Esfahan , Iran , Using NOAA Satellite Imagery" ,Agricultural Water Management 88, pp. 99-109, (2007)

9- Smith, M., 1991. CROPWAT: Manual and Guidelines. FAO of UN, Rome, Italy.

۱۰- گزارش جاماب – حوزه رودخانه شور

۱۱- مطالعات ساماندهی آب‌های سطحی جنوب تهران، مهندسین مشاور یکم، آبان ماه ۱۳۸۸